

金属矿产资源的深部找矿、勘探与成矿的深层动力过程

滕吉文^{1,4}, 杨立强², 姚敬全³, 刘宏臣¹,
刘 财⁴, 韩立国⁴, 张雪梅¹

(1. 中国科学院地质与地球物理研究所, 北京 100101; 2. 中国地质大学, 北京 100083;

3 中国地质科学院, 廊坊 102849; 4 吉林大学, 长春 130026)

摘 要 世界上任何一个国家或地区, 在科学与技术的进步, 社会与经济的发展进程中, 无一例外的必须以大量的, 各种类型的金属矿产资源为后盾. 当今我国正处在快速工业化和经济腾飞的前夜, 国内矿产资源供给不足, 且紧缺, 故对外的依存度日益增大. 为此, 在多元化共享世界资源的同时, 必须以本土资源为本, 并迅速建立起安全、可靠与稳定供给的重要金属矿产战略后备基地. 本文基于金属矿产资源形成和聚集的深部介质和构造环境, 深层过程和动力学响应的新认识, 并分析和讨论了国内、外已发现的深部金属矿床实例. 据此提出: 必须迅速强化进行地壳内部第二深度空间(500~2000 m)高精度地球物理找矿、勘探和深入研究深部物质与能量的交换与矿产资源形成的深层动力过程.

关键词 深部物质与能量的交换, 金属矿产资源形成的深层过程, 动力学响应, 第二深度空间的找矿、勘探, 高精度地球物理方法与技术

中图分类号 P631

文献标识码 A

文章编号 1004-2903(2007)02-0317-18

Deep discover ore、exploration and exploitation for metal mineral resocres and its deep dynamical process of formation

TENG Ji-wen^{1,4}, YANG Li-qiang², YAO Jing-quan³, LIU Hong-chen¹,
LIU Chai⁴, HAN Li-guo⁴, ZHANG Xue-mei¹

(1. *Institute of Geology and Geophysics, Chinese Academy of Science, Beijing 100029, China;*

2. *China University of Geosciences, Beijing 100083, China;*

3. *Chinese Academy of Geological Sciences, Langfang 102849, China*

4. *Jilin University, Changchun 130026, China*)

Abstract The advance of science and tecndogy, develop of society and economy for any countris and areas in the word must be the backing for great quantity and all kinds metal mineral resources. China is just the eve for rapid industrialization and economic prance, but internal supply haven't enogh and very deficency at the present time, so result in makes increas unceaslu of the dependent degre on aborad. Therefore use word's mineral resources by many way at the same time, determined to have a foothold in national resources and rapid to building the strategic reserve base of matal mineral resurces for safety, reliable and stable supply. In view the new understand; for deep medium and structural environment、deep process and dynamic response for formation and acomulation of metal minearal resoreces, we are analysed and discused a few fact examples for deep metalliferous deposit of China and abroad. According to these suggest; ① must be rapid strengthen develop discover ore、exploration of metal mineral resources in second deep space (depth: 500 m to 2000 m) by geophysical method and tecnology of high precision, ② go deep into study the substance

收稿日期 2007-02-10; 修回日期 2007-03-20.

基金项目 2007 年中国科学院学部咨询项目, 中国科学院知识创新工程重要方向(KZCX3-SW-148)、国家自然科学基金资助项目(4043009)和“十一五”国家科技支撑计划重点项目<危机矿山接替资源技术与示范研究>(2006BA01A13)联合资助.

作者简介 滕吉文, 男, 1934 年生, 研究员, 中国科学院院士, 主要从事地球物理和地球动力学研究. (E-mail: jwting@mail. ig-gcas. ac. cn)

and energy exchanges in depths and its deep dynamic process of formation of metal mineral recorces.

Keywords Exchanges of substance and energy in depths, Deep process of metallogenesis, Dynamic reponse, Discover ore and exploration of second deep space (500 m~2000 m), Geophysical exploration method and technology of high precision

0 引 言

人类社会生存和发展的基础是物质生产. 矿产资源是人类社会和经济发展的物质基础, 任何国家科学与技术进步, 社会与经济的发展都必须依靠矿产资源为后盾. 世界上最早工业化的国家如法国、英国是这样, 后来发展起来的美国、德国和日本也是这样, 现今要迅速发展的国家和将要发展的国家同样也离不开矿产资源的支撑. 这是因为快速工业化的进程是人类大量消耗矿产资源, 加速积累社会财富、高速发展经济和不断提高人民生活水平的过程, 是人类发展历史不可逾越的必然阶段. 我国正面临着快速工业化和经济的腾飞, 资源的持续、安全供给已成为民富、国强和国家安全的关键. 我国地大物博、人口众多、资源相对紧缺、环境承载能力较弱, 这些是我国的基本国情^[1]. 我国人均主要资源的占有量不足世界平均水平的 1/2 到 1/3, 并且这种状况随着人口的持续增加和经济高速增长还会进一步恶化. 为此, 当今国内供给不足, 各类金属矿产资源的紧缺已为必然, 故对国外的依存度正在日益增长.

在 20 世纪的百年里, 地球为人类提供了海量的矿产资源, 据不完全统计在全球范围内为人类提供了 1420 亿吨石油, 78 万亿立方米天然气, 2650 亿吨煤, 380 亿吨 (粗钢) 铁, 7.6 亿吨铝, 4.8 亿吨铜和大量的矿物原料^[2], 积累了巨额的社会财富, 极大地促进了全球经济的繁荣. 毫不夸张的说, 没有如此巨量的矿产资源就没有今天的世界文明, 离开矿产资源的勘探、开发和利用就谈不上科学技术的进步和人类社会与经济的发展, 即使是当今的信息时代也必然是如此.

然而人们应当清晰地看到, 矿产资源的消耗将必随着时代前进的步伐和经济快速发展的世界大潮呈快速增长. 我国人口约占世界人口的 21%, 但石油、天然气、铁、铜、铝等矿产资源占世界总储量的比例却不足 5%, 已探明主要金属矿产的人均储量尚不足世界人均值的 1/4. 伴随着今后矿产资源需求的快速增长, 国内重要矿产资源供需缺口还将继续加大. 当今我国正面临着国内矿产资源严重供给不足与十分紧缺的格局, 怎样来解决矿产资源的可靠

与安全的供给, 并促进国民经济的可持续发展乃是摆在地球科学工作者面前的, 必须解决的, 且又刻不容缓的重要任务. 究其途径, 只有两条:

第一 多元化的利用世界矿产资源. 因为多种矿产资源, 特别是大型、超大型矿床和多金属矿集区在世界上的地理分布是极不均匀的, 即有些国家铜矿多, 有些国家铁矿多, 有些国家铅、锌矿多, 有些国家黄金多, 有些国家铝矿多……等等. 这便说明; 为了世界各国的共同发展, 在全球范围内存在着一个互补的问题, 即彼此要各向富有某些矿产资源的国家或地区去购买或交换本国所急需的矿产资源, 以支撑本国的经济发展. 这就是说在共享世界资源的前提下, 必须科学的协调和合理的利用世界矿产资源. 因为, 科学技术的进步, 社会与经济的发展在矿产资源问题上存在的这种严重的供、需矛盾不会在短时期内、或靠个别国家与局部地区可以得到完善解决的, 即为在相当长的历史时期内均存在着大范围, 乃至全球性的互相补给与协调. 基于全球整体资源相对富足, 而在发展中国家近 30 亿人口新一轮工业化高潮到来之前, 供求趋势有利于我国比较经济地利用国外资源以支撑经济发展. 为此, 未来 10~15 年间将是我国利用国外资源的战略机遇佳期.

第二 加强本国陆地与海域的矿产资源勘查, 迅速建立起金属矿产资源, 特别是紧缺矿产资源的战略后备基地. 这是当今我国最为重要的历史使命. 因为一个国家要发展、要繁荣、昌盛, 人民要安居乐业, 并独立于世界民族之林! 在新的历史条件下, 要真正实现和平发展, 就必须保证"崛起", 即就必须依赖于矿产资源的持续、安全和可靠的供给, 才能够有利于可持续的发展、创造丰硕的财富并造福于人类! 为此, 中国在拥有公平地利用世界资源权利的同时, 还必须充分利用本国资源和发展走比较优势的节约型道路.

面对这一现实与格局, 通过基础与理论研究发现, 金属矿产资源的形成; 乃是受到地球内部物质分异、调整和物质与能做量的交换及其深层动力过程的制约. 因此, 充分认识地球本体是十分重要的^[3,4]. 这就是说, 矿产资源的形成与矿物元素的聚集, 不会仅限于地球的浅表层, 而必须究其纵深的展布和延伸.

为了便于阐明和讨论有序起见,我先把找矿、勘探深度空间的定义做一厘定^[5];第一找矿、勘探与开发深度空间,是指由地表到深度为 500 m 处;第二找矿、勘探与开发深度空间,为指由 500 m~2000 m 的深度范围;第三找矿、勘探与开发空间,系指大于 2000 m 以下或更深处的找矿、勘探与开发空间. 这里应当说明的是,尽管在地壳深处尚存在矿化现象,但亦并非可以“无限”制的向下延伸. 因为越往深处,由于深部介质与结构条件和物理—力学环境及其状态的变异,故找矿、勘探与开发的难度将必增大,要求的技术条件将必更加苛刻.

基于这样的前提,即矿产资源供、需的严重失调,但是也应当清晰地认识到;当今我国所公布的各种金属矿产的资源量,均系指第一深度空间探查的矿产资源量(即平均为由 0~500 m 深处),而矿产资源的开发在主体上则平均限于 0~350 m 深度范围内进行. 这就是说,当今所统计、所公布,即所讲述的矿产资源“瓶颈”是不够完全的,它尚不能完全表征我国地下所储藏的各类金属矿产资源量的全部,而仅系第一找矿深度空间的资源量.

为此,必须将深部找矿立即提上日程,即进行广泛的深部找矿、勘探与开发,特别是要迅速强化进行地壳内部第二深度空间(500 m~2000 m)的找矿、勘探和资源的开发与利用,以待深部大型、超大型矿床和多金属矿集区的发现. 与此同时还必须强化在老矿区周边、邻区和深层再找矿、再勘探和发现第二找矿、勘探深度空间的新矿床. 这就是说,在立足于本土矿产资源问题上,主要是指在这两个层面上的找矿、勘探和开发.

1 当今我国金属矿产资源严重紧缺的基本格局

1.1 矿产资源紧缺的基本势态

从古至今,不论是从原始社会进入到奴隶社会,由奴隶社会进入到农业社会,还是从农业社会进入到资本主义社会的进程中均雄辩的告诫人们,矿产资源是人类社会和经济进步的物质基础. 尽管不同国家经济发展阶段、科技发展水平、社会形态各异,但是对矿产资源和以其为原料或材料的科学与技术,如能源、冶金、化工、建材等相关产业的不可替代性乃是“永恒”的,包括世界上工业化和后工业化时期的各个国家均如此. 矿产资源作为发展经济、积累社会财富、提高人民生活水平的物质基础的本质是不会改变的^[2].

基于先期工业化的一些发达国家经济与社会发展的历程和经验,进而系统地、深入地研究中国正处在工业化进程中对金属矿产资源的大量需求和供给势态,科学地确立符合中国国情的矿产资源战略,对于我国经济与社会的可持续发展具有深远的意义.

我国自全国解放以后,经全国地球科学与技术工作者们的共同奋发努力,已发现矿产资源 171 种,探明有储量的矿产 158 种,根据经济可采储量和其对 2020 年需求的保障程度,可将我国 45 种主要矿产资源划分为 4 个级次:①可以保证供给的有:稀土、菱镁矿、膨润土等 8 种矿产;②不足的有:天然气、钨、钼、磷、钛等 10 种矿产;③短缺的有:石油、煤、铀、铁、铝土矿、铅、锌等 21 种矿产;④严重短缺的有:铜、铬、钾盐等 6 种矿产(据王安建、王高尚,等资料,2003).

1.2 大、中型金属矿山资源枯竭程度与日俱增

在 20 世纪末我国 25 种主要金属矿产的 415 个大中型矿山中,目前已关闭了 38 个,占大、中型矿山总数的 9%;严重危机的矿山 54 个,约占 13%;中度危机的矿山 35 个,约占 8%;轻度危机的矿山 82 个,约占 20%左右.

近年来,我国大、中型矿山资源枯竭程度与日俱增,其中严重危机及闭坑的矿山总数已由 2001 年的 191 座(占 46%),上升为 2003 年的 230 座(占 55.4%),再上升为 2005 年的 252 座(占 60.7%);潜在危机矿山则由 2001 年的 99 座(占 23.9%),下降为 2003 年的 98 座(占 23.6%),再下降为 2005 年的 82 座(仅占 19.8%);中度危机以上矿山由 2001 年的 92 座(占 22.2%),上升为 2003 年的 132 座(占 31.8%),再上升为 2005 年的 167 座(占 40.2%);尚无危机的矿山由 2001 年的 188 座(占 45.3%),下降为 2003 年的 149 座(占 35.9%),再下降为 2005 年的 130 座(仅占 31.3%). 如果不能尽早采取有效措施,预计在未来 10 年间,我国大、中型金属矿产矿山的年产矿石将要减少近达 7700 万吨^[6]. 我国当今矿山保有储量面临严重危机,急需加强矿山深部和外围(即第二轮的)的找矿、勘探和开发,以达发现或扩大后备资源,延长已有矿山的产出寿命.

2004 年 9 月 6 日,国务院常务会审议并原则通过了《全国危机矿山接替资源找矿规划纲要(2004~2010 年)》,作出了“以矿山外围和深部找矿为主,努力扩大危机矿保有储量”的工作部署. 为危机矿山外围及深部找矿工作的全面展开指明了方向.

表 2 2010 年和 2020 年矿产需求及供需缺口预测

品种	单位	2003 年	2010 年			2020 年		
		矿山产量	矿山产量	需求	缺口	矿山产量	需求	缺口
煤炭	原煤/亿吨	16.7	17.9	20.5	2.6	16.3	22~24	5.7~7.7
铁矿石	铁精矿/亿吨	1.35	1.55	3.9~4.5	2.4~3.0	1.65	3.2~4.0	1.6~2.4
铜	含铜量/万吨	60.4	70	450~480	300~350	80	640~690	410~460
铝	氧化铝/万吨	611	1100	880~1000 金属铝	360~600	1200~1400	1400 金属铝	1100~900
磷矿	标矿/万吨	2447	4600	5200	600	5100	5700	600
钾盐	K ₂ O/万吨	71	240	910	670	340	1150	810
水泥	亿吨	8.2	6.8~7.5 (水泥灰岩)	9.5~10.5	/	7.0~7.9 (水泥灰岩)	12.7~14.3	/

(据王安建,等人资料 2003)

2006 年 1 月 28 日,新华社播发了《国务院关于
加强地质工作的决定》,提出以国内急缺的重要矿产
资源为主攻矿种,兼顾部分优势矿产资源,按照东部
攻深找盲、中部发挥特色、西部重点突破、境外优先
周边的方针,实施矿产资源保障工程.进一步明确了
我国非能源重要矿产资源勘查的战略布局.

由以上分析可见,金属矿产资源的供、需矛盾日
益尖锐,摆在地球科学工作者面前的任务是:急国家
之所急,急民族发展之所需,必须从战略需求出发,
突破已有找矿,勘探和开发的理念和框架,在为多元
化利用世界资源的同时,坚实地立足于本国.为此,
向深部“进军”已为必然!

2 金属矿产资源对外依存度正在不断扩大

2.1 2001~2004 年期间金属矿产资源的需求与对
外依存度增长概况

近十年来,中国重要金属矿产的国内自主供应
能力与消费需求之间的差距逐年扩大.据统计;

2002 年铁矿石、矿山铜、氧化铝产量对冶金业
的缺口分别为 34%、64.5%和 41%.

2003 年我国铁矿需求量的对外依存度已达到
52%,铝对外依存度接近于 40%,铜接近于 70%,钾
盐却超过了 80%(表 1)

同时由于我国矿业“走出去”开发境 外资源起
步较晚,矿产企业的境外开发对国内资源的补给数
量十分有限,因此大部短缺矿产资源仍需通过国际
贸易市场购进.

2003 年我国消耗矿产资源量已超过 50 亿吨,
并成为世界上矿产资源第二大消费国家.

2004 年的金属矿产对外依存度为:铁矿石进口
量为 2.08 亿吨,对外依存度为 45%;铜进口量为

270 万吨,对外依存度为 80%;氧化铝进口量为 588
万吨,对外依存度为 57%;铝精矿进口量为 83 万
吨,对外依存度为 44%.

表 1 2003 年我国主要矿产品的生产、
消费及对外依存度

品种	矿山 产量	冶炼加 工产量	消费量	对外依 存度%
铁矿石/亿吨 (成品矿)*	1.35	2.22(钢)	2.81	52
铜/万吨**	60.4	184	321	69
铝/万吨***	305	596	548	37
钾盐/万吨	71	/	482	85
磷矿/万吨标矿	2447	/	4739	7
水泥/亿吨 (水泥灰岩)	6.6	8.62	8.4	0

* 平均品位 64%; ** 铜精矿、精铜及废铜合计; *** 氧化铝折合
金属铝

由以上三年的基本情况可见,各种矿产资源对
外依存度逐年增大.

2.2 2010 年和 2020 年及以后,我国对重要的、大
宗的矿产资源需求与缺口形势分析和预测

2020 年我国重要矿产资源累计缺口为:铁矿石
约 40 亿吨(成品矿),相当于我国现有储量的 2/3;
铜约 6000 万吨,相当于我国现有铜矿储量的 3 倍
多;铝约 8000 万吨,相当于我国现有储量的 2/3.

2010 年和 2020 年我国对金属矿产资源量的缺
口可见表中的预计.根据先期工业化国家的经验,
2020 年以后,我国庞大的资源消费基数还要持续一
段时间,矿产资源及其相关产业在我国绝不是渐行
衰退的产业,故保障矿产资源的安全供应将是我国
实现工业化和现代化必须面对的长期的战略任务.

在 2010 年和 2020 年期间,矿产资源如此巨大的缺口,则其对外依存度当必日益增大,可见;

煤炭需求量与对外依存度

2010 年:21 亿吨,2020 年:28 亿吨. 10 年累计需求 160 亿吨,20 年为 360 亿吨,能保障未来需求.

钢(铁)需求量与对外依存度

2010 年:2.72 亿吨,对外依存度上升到 55~57%.

2020 年:3.0 亿吨,对外依存度上升到 50~60%.

铜矿需求量与对外依存度

2010 年:448 万吨,对外依存度 56~60%.

2020 年:581 万吨,对外依存度 51~60%.

铝土矿的需求与对外依存度

2010 年:840 万吨,对外依存度 30~36%.

2020 年:1260 万吨,对外依存度 28~50%.

锌矿的需求与对外依存度

2010 年:246 万吨,对外依存度 10~14%.

2020 年:265 万吨,对外依存度 30~40%.

钾盐的需求量与对外依存度

2010 年:缺口 670 万吨,对外依存度 70~75%.

2020 年:缺口 810 万吨,对外依存度 70%.

显然,无论是从经济角度、还是安全方面考虑,中国未来 20 年快速工业化进程中的矿产资源有效供应仍然将面临着一系列的严重问题有待不断解决. 矿业作为矿产资源供应的实体,是国家矿产资源安全供应保障体系的重要组成部分. 分析中国矿业存在的问题,研究其可能遇到的各种挑战,快速提升中国矿业的国际竞争能力和矿产资源自主供应能力,应该是当前一项十分重要而又迫切的任务.

3 国内、外深部大型、超大型矿床和矿集区的发现

3.1 金属矿产矿集区找矿不断取得新进展;标志着深部矿产资源的潜在度

在大型、超大型矿床和多金属矿集区的发现上,特别是深部矿产资源的勘探与开发,近些年未取得明显成效^[7~9].

(1)环太平洋地带的大型和超大型金属矿床

国外在已知成矿区(带)找矿中不断有新的发现和突破,即找到了一批大型、超大型矿床^[7]. 最典型的例子是 20 世纪 80 年代在环太平洋成矿带找到了一批大型、超大型的斑岩型铜矿和浅成低温热液型

金矿. 就金矿床而论,发现了举世瞩目的矿床有巴布亚新几内亚的波尔盖拉金矿(截至 1988 年勘探资料,求得金储量 420 吨)和利希尔金矿床(1981 年发现,金储量 585 吨,资源储量 330 吨),日本九州菱刈金矿(1980 年发现,金储量 120 吨,加上近年来在其附近发现的山田和山神金矿床,总储量约 260 吨),美国的麦克劳林金矿床(1981 年发现,金储量 100 吨),印度尼西亚的格拉斯贝格铜、金矿床(1988 年发现,铜储量 913 万吨,金 1217 吨,银 2060 吨),菲律宾的“远东南”铜、金矿(1987 年发现,铜储量 260 万吨,金 440 吨)和泰桑铜、金矿(1983 年发现,铜 180 万吨,金 180 万吨),智利马里昆加浅成热液金矿—斑岩金矿带的雷富希奥(可采储量金 103 吨)和拉科伊帕金矿床(金 126 吨),美国的“卵石滩”斑岩型铜金矿床(1989 年发现,铜 160 万吨,金 187 吨),以及多米尼加的旧普韦布洛金矿、裴济的维提岛金矿和新西兰的北岛金矿等.

(2)20 世纪 80 年代以来在加拿大和美国发现的深部矿床^[8]

20 世纪 80 年代在加拿大阿比提比绿岩带上发现赫姆洛(Hemlo)(500~600 吨)“金巨人”. 美国的卡林金矿带;自 1962 年发现金矿以来,到 1988 年,共发现和勘探金矿床 21 个,总可采储量达 1026 吨,其中金坑金矿(319 吨)和波斯特-贝茨金矿床(551 吨)是该矿带中 20 世纪 80 年代发现的两个最大的金矿床. 近年又相继在卡林金矿带深部发现了克米尔金矿(140 吨)和派普莱恩金矿床(130 吨).

(3)20 世纪 90 年代以来在智利、秘鲁和南非等地发现的深部矿床^[8]

20 世纪 90 年代在智利发现色罗卡塞尔(Cerro Casale)巨大金矿(850 吨)及在智利和阿根廷交界处发现的帕斯卡-拉马(Pasca-Lama)大金矿(544 吨);秘鲁的亚纳科查(Yanacocha)金矿. 在多年来的不断勘查中发现;其储量在 20 世纪 90 年代已大大扩大了,金储量已达 1340 吨. 南非维特瓦特斯兰德含金盆地西翼的博塔维尔(Bothaville)空白带又发现了一系列的金矿床,合计金的资源量达 2591 吨.

这一系列金属矿产资源的勘查发现,使得全球金的储量大大增多,2002 年世界金的可采储量已从 20 世纪 60 年代中期的 3.11 万吨增加到 4.25 万吨.

3.2 国外采矿深度远大于中国,标志着深部存在着找矿、勘探与开发空间

当今关键的问题是在地壳深部,主要是指在第二找矿、勘探的深度空间(500 m~2000 m)有没有

可供勘探和开发的金属矿产资源存在？即是否存在具一定工业品位的大型、超大型矿床和多金属矿集区？为此，必须从全球范围内来认识，从实践出发来分析与探讨国内、外金属矿产资源深部找矿、勘探的深度空间，途径和例证。据国外有关资料报导，在国外的找矿、勘探与开发中，以金矿床为例，其矿化深度是很深的，平均可达 1600 m，而其中印度的科拉尔金矿床深度已达 3500 m^[9]。

近年来，在全球范围内对于大型、超大型矿床和多金属矿集区形成的深层过程和动力学响应越来越为人们所共识。因此，前苏联、澳大利亚、美国、加拿大、日本等国家对此均十分重视^[9~13]，并制定了相应的计划。

(1)世界上有关国家深部找矿、勘探与发现的几个实例概况

据不完全统计，国外金属矿产资源开采超过 1000 m 的已大约有 80 多座(大型)。国外在已有矿床区(带)的深部已不断找到和发现了一系列大型、超大型矿床和大、中型金属矿产资源矿集区^[7~9]。正如上述，即特别是 20 世纪 80 年代以来在环太平洋成矿带找到了一批大型、超大型斑岩铜矿和浅成低温热液型金矿床。下面举几个典型矿例来加以阐明：

①目前世界上开采最深的矿床是南非西兰德的 Western Deep Level 金矿，现已开采到 4800 m，不久可达 5000 m 左右。

②加拿大萨德伯里(Sudbury)铜、镍矿床，围绕萨德伯里(Sudbury)杂岩体有 30 多个铜、镍矿床，其中有不少是属于大、中型矿床，现已开采到 2000 m。目前探测最深的矿体在维克多(Victoria)已达 2430 m，鹰桥公司(Falconbridge)和因科(Inco)公司所属最深金属矿床的钻井已打到 3050 m。

2004 年在西麦克雷迪(McCreedy)和莱尼氏克·富特沃尔(Levack footwall)钻井在钻抵 1180 m 处时发现了特富的矿床。

在诺兰达(Noranda)矿田(VMS 火山岩块状硫化物矿床)的米伦贝齐、科伯特、安西尔等矿床，主矿体深度均抵 700 m~1280 m。

③澳大利亚奥林匹克坝(Olympic Dam)Cu-Au-U 矿床在深 1000 m 处发现了隐伏的几乎直立的铜、金、铀矿床^[8]。

3.3 中国有关深部找矿、勘探和开发的部分实例概况

近年来，我国地球科学各有关学科的科学和技术人员均认识到，大型、超大型矿床和多金属矿集区的时空分布在本质上是受着地球内部物质与能量的交

换和其深层过程的制约，故成矿过程应受地壳演化与动力学响应的控制^[14~17]，而岩石圈的不连续和再活化却为大型、超大型矿床和多金属矿集区形成的深层动力过程和矿物元素聚集空间提供了重要的边界条件^[17~21]。事实表明，在我国各成矿区(带)，即在其地壳深部第二找矿、勘探与开发的深度空间也均发现了一些矿床^[11,14,22,23](2005 年 5 月与矿床学家秦克章研究员讨论时也提供了部份信息和数据)，如：

①辽宁红透山铜矿勘探开发深度已可抵 1100 m，且还在向深处延伸。

②铜陵冬瓜山特大型铜矿床的产出深度已在 1000 m 以下。

③凡口铝锌矿在深度 500 m 以下找到了 100 万吨级以上的可采金属储量。

④江西银山铜、铅、锌、金、银矿在 800 m 深度左右处主为金和铜。12 孔深度>1000m 的钻井，在 3 孔 1500 m 的钻井中均发现富有 Cu、Pb、Zn 的矿床。

⑤福建紫金山金、铜矿床距地表的深度已达 1900~2000 m 左右。

⑥新疆阿尔泰阿舍勒铜、金、锌特富矿床深度可达 1800 m 左右。

⑦四川会泽麒麟厂铅、锌矿床的富矿体已延伸抵 1300 m 以下。

⑧山东马塘、浮山的金矿床已深达 1200 m 和 1000 m 左右。

以上所举国内、外的一些深部矿床找矿、勘探与开发的实例，均是在这样的深度，即第二找矿深度空间找到的金属矿床。在各矿区的这些矿体向深部还会延伸到多深，以及怎样延伸等目前均尚未能给出最后答案。

随着深部找矿、勘探的进展，地球物理勘探和地质找矿勘探工作当必加强，很多新的成矿现象、成矿环境和新类型矿床将会陆续发现，这将必会大大丰富第二深度空间地球物理找矿、勘探和深部矿床学的研究内容，并为成矿的机理和找矿实践研究提供了新的机遇和空间。

4 为什么第二找矿空间能够找到大型、超大型金属矿床和矿集区呢！

4.1 金矿床的成因与对深部找矿的启迪

近年来，一些矿床学家在对各类矿床模式研究的基础上，探索金属矿床与地壳结构的关系，即从深度更大的空间去研究和探索矿床的分布规律^[24]。

澳大利亚、加拿大等国家对太古宙绿岩带热液

脉型金矿床的成矿时代、成矿条件、流体和矿物元素的来源及分布特征等研究^[25]提出了太古代脉状金矿的地壳连续成矿模式,认为金的成矿是复杂地壳规模的构造—岩浆—热演化史的一种表现形式,不同变质岩中的热液脉型金矿床属于一组相关的成因群,可能表征跨越很大地壳厚度的一种连续统一体,其成矿温度变化范围在180~700℃之间,成矿压力至少在100~500 MPa之间。在分布上,金矿床从最低级变质的次绿片岩相环境到麻粒岩相都有分布,与其相应的矿床是,威卢纳金矿是产在最低级变质环境中,其形成深度可能不足5 km;格里芬斯德金矿是形成于最高级变质环境中的金矿床,形成深度大于20 km;绿片岩相的金矿床可以金英里和芒特夏罗特金矿床为代表;而大贝尔和弗雷泽斯金矿则是在角闪岩相环境下形成的金矿床。

太古代脉状金矿床形成的地壳连续成矿模式的提出,打破了以往认为金矿床不能在麻粒岩相岩石中形成的认识,丰富了变质岩区金矿成矿理论,为前寒武纪深变质岩区金矿找矿勘探提供了新的思路。

此外,广义的斑岩成矿模式^[26]为在中生代陆相火山岩区以浅成低温热液型金矿为线索,故为寻找深部隐伏的斑岩铜矿提供了重要思路。

4.2 金属矿产资源形成与聚集的深部成因

地面浅表处所见的金属矿产资源,如大型、超大型矿床和多金属矿集区的形成,均是由于地球内部在地史期间深部物质与能量的交换所致,而不是近地表处形成与堆积的^[27,28]。因为矿物元素的分异、调整、运移和聚集,即大型、超大型矿床和矿集区的形成与分布是受着深部物质与能量的交换和其物理-力学-化学过程的制约,即热物质在运移和上涌过程中与壳、幔介质和围岩的交代、变质作用后而逐渐聚积的。为此就必须涉及到地球深处壳、幔介质与构造格局、物质状态、运移行为、物质属性和其空间展布的深层动力过程。这便表明,当今第一深度空间找矿、勘探和开发空间的已有矿产资源,它们并非是我国地下矿产资源的整体或全部,而在第二深度空间当必尚存在着矿体的继续伸展和聚集。

4.3 地壳内部深处存在丰富金属资源的找矿、勘探空间

基于国家战略需求和金属矿产资源供、求矛盾的日益加巨,向深部找矿、勘探和开发已为必然。成矿理论和找矿实践均表明,深入研究和精细刻划壳、幔介质的层、块结构和圈层耦合及物质与能量的交换是十分重要的^[20,21,27,28]。

(1)理论上,在地球深处的有利的成矿空间一般为5~10 km。因为这个空间恰为地壳内部物质与能量强烈交换和其动力作用的汇聚地域;也是多种金属成矿要素发生突变和耦合的转换地带,适宜于成矿元素在动力作用下的聚集与大量岩浆岩矿床和热液型矿床的产出。根据一些成矿带的综合研究表明,一个大型热液型成矿系统的垂直延伸可达4~5 km^[29]。

基于地球内部物质的分异、调整,深部物质运移和上涌,并在这一进程中热液物质与围岩不断交代和蚀变,于是含矿元素不断聚集,并逐步形成了大型、超大型矿床和多金属矿集区。这便表明,成矿进程是地球深部物质与能量的交换和其动力过程的产物^[27,28],即地球深部乃成矿的源泉。

(2)实践上,俄罗斯科拉半岛科学超深钻井在6~12 km深处均存在硫化物矿化细脉,在1.54~1.81 km处存在铜、镍、硫化物和铂金属矿化;在深达5.6 km处发现铁硫化物矿化和铁氧化物矿化;在10 km上下的变质基性岩中发现了铜、镍硫化物和基性岩中的铁、锑矿化;在9.5~11 km处发现了含大量银的自然金^[30]。幔源金刚石,可能最初形成于岩石圈底部。这些现象说明;在地壳中相当大的深度空间内,均具有形成金属矿床的有利空间和相应的成矿条件,故对多金属矿在第二深度空间找矿、勘探与开发的潜力巨大。

这也就是说,由于壳、幔物质与能量的交换和运移,在地壳深处相当大的深度空间内,均形成、并存在金属矿物聚集的矿床和有利空间与相应的深部介质和构造环境^[3~5]。为此,在深部寻找和发现大型、超大型矿床和多金属矿集区是有着必要和充分的理论与实践依据的。

5 金属矿产资源的形成与聚集

5.1 深部壳、幔结构与构造和控矿作用

为了提高成矿预测的可靠性,早在20世纪30年代已有一些学者就开始探索矿床分布与地壳深部结构之间的相互关系^[31,32]。这之后,深部构造对金属成矿作用的重要性逐渐被越来越多的研究者所认识^[33~35]。

20世纪80年代以来,随着地壳深部,壳、幔结构探测技术的提高和将地球作为整体系统概念的增强,人们对大陆地壳运动与形态及其深部结构与演变过程的认识大为改观。在现代矿产资源的勘查中,对深部壳、幔结构的控矿作用研究已从局部矿展到

全球,从大洋扩展到大陆,从地表浅部扩展到地壳深部乃至地幔^[36~46].地幔不连续面的起伏、地幔对流系统(地幔柱构造和拆沉构造)、地幔介质与结构的不均一性对地壳中金属元素富集控制作用的研究均取得了重要进展^[47~50],从而大大拓宽了原有深部找矿、勘探与开发的思路,将深部构造对矿集区控制作用的研究提高到新的高度,推进了区域成矿作用地球动力过程研究^[27,28,51~53].

对全球大型矿床与区域性壳、幔深部构造关系的研究表明^[41,54],从表面上来看,好似矿床的分布仅受到地壳浅表层应力作用形成的断裂影响强烈,但实质上,矿床的分布主体上是受地幔隆升动力作用等深部因素的控制.同一成矿带或矿区内的矿床(无论内生或外生)或矿体其分布是不均匀的,且多在构造叠接的某些局部地段富集^[49,55,56].地壳内部金属矿床分布规律研究的重要结论之一是;大型矿床和矿集区与岩石圈(包括地幔)各个层圈的耦合,层、块结构的变异及物质组成的不均一性和各向异性密切相关.金属矿床趋向于赋存在地幔隆起区和地幔底辟区,这对于幔源的金、铜、镍、金、锡、钨、钼等矿床及大型热液铀矿床均表现得尤为明显^[57~59].

5.2 深层动力过程与成矿

随着现代地球科学研究的逐步深化,金属矿床成矿学研究的重点逐渐由地表、或浅表层转向隐伏(或半隐伏)矿床的研究和大型、超大型矿床及矿集区的探寻与预测^[41].应当特别指出的是;前苏联科拉半岛的超深钻井,在穿越古大陆地壳达 12 km 深度时、不仅证明了比早先推测的成矿深度要大得多的成矿可能性,而且使得解释各种条件下形成的不同时代沿垂向堆积的各类矿化分布成为可能^[30].这便迫使人们必须把找矿、勘探和开发的注意力集中在对深部物质与能量的交换及其深层过程的研究视为推动矿床学发展的重要动力之一^[59~61],且将成矿作用视为地壳演化的组成部分.为此,探测壳、幔深部结构、构造及其深层动力过程与控矿作用已成为成矿学研究的重要前沿领域和发展的必然趋势^[52~54].

前苏联、澳大利亚、美国、欧洲科学基金会、日本、加拿大和中国等国家纷纷制定了矿床形成与地球动力学演化密切相关的重大研究计划^[62~67].这些研究大多以大陆深部壳、幔结构和深层动力过程与成矿物质供给—运移—聚集过程为研究核心,从壳、幔相互作用与物质—能量交换和运移的新视角来研

究陆内的成矿过程,试图通过对成矿作用与深层过程和地球动力学响应的探索和导向,以资发现矿床形成的深部介质和构造环境和其形成的动力学响应,进而增强找矿、勘探的预测能力^[27,28].

应当清晰地认识到,当今金矿化与下地壳和上地幔的成生联系已受到了不少学者的重视^[68~77].有证据表明^[78,79],地幔物质运移在我国及全球众多金矿床成矿过程中十分重要,乃至幔原岩浆直接成矿(成矿流体中显示有地幔同位素和微量元素的痕迹),或者间接地为成矿提供热源.例如,小秦岭金矿田^[80]、胶东金矿^[81]、云南“三江”金矿成矿带^[82]、冀西北地区金、银矿^[83]、吉林夹皮沟金矿田^[84,85]、黔西低温卡林型金矿^[86,87].此外,热泉型金矿^[88]与碱性岩有关的金矿^[89]也是幔源物质成矿作用的极好例证.澳大利亚的成矿研究表明,热液矿床的成矿物质多主要为壳源;但是不断有证据提出,地幔物质也参与了许多矿床的形成与动力演化作用.例如,壳、幔相互作用在产生地壳尺度的非造山地壳熔融过程中形成了奥林匹克坝(Olympic Dam)矿床^[90];Yilgarn 地块太古宙金矿被认为是地幔流体上涌携带成矿物质,同时壳、幔混合流体从围岩中淋滤出金元素而形成的^[25];Lachlan 造山带 Sr 和 Pb 同位素研究^[91]和 Broken Hill 矿床微量元素研究也证实了幔源物质参与了成矿作用和成矿过程.

上述资料表明,从地球动力学的角度来看,大型、超大型矿床和矿集区的时空分布在本质上受到深部物质运移和深层过程的制约,而壳、幔物质与结构和构造则是控制着地壳内部大规模流体的分异、调整、运移、聚集与形成的三维空间和最主要的深部因素^[91~94];通过深部热物质运移的研究,建立了岩石圈结构和构造及运动学与动力学模型、非线性成矿动力学及矿源区介质与构造环境等概念^[28,57].深入探讨岩石圈及与相邻圈层物质和能量交换及其深层动力过程与介质及结构的各向异性^[95,96],对认识成矿元素的离散与聚集的机制及时空格局,并有益于预测金属矿床出现的类型和聚集的空间部位,从而为大型、超大型矿床及矿集区的探查和预测提供导向.

6 地壳内部第二深度空间找矿、勘探与开发的科学和技术支撑

近 20 年来,由于科学技术的快速进步,社会与经济的高速发展和国家安全与人民生活水平的日益提高,地球为人类提供了,并尚在提供着大量的、

各种类型的金属矿产资源. 为此,在金属矿产勘查中,基于高、新技术的有序引入,故新理论、新概念不断涌现. 新技术、新方法的应用^[97],有力的促进了矿产资源的勘查与发现能力,为金属矿产资源勘查注入了生机与活力.

6.1 开展第二深度空间找矿、勘探与开发的综合地球物理方法和技术

当今地球科学与技术工作者主要是通过人的肉眼,即光与地面浅表层矿体的联系(包括坑探、槽探和浅孔)已逐难凑效,而是必须穿越地平线深入到地下深处去探寻隐伏的和潜在的深部矿藏. 基于当今世界上最深的超深钻井也只打到 10 km 左右(前苏联科拉半岛超深钻井打到 1226 m),石油钻井一般为 1~3 km(最近中国石油化工股份有限公司在塔里木盆地塔河油田打了一口 8 km 左右深度的钻井)深度. 显然,这是与高精度的人工源和天然源地地球物理场等深部探测深度无法相比. 高精度的重、磁、电场可在较大范围内探测地下介质结构、构造和物质的物理—力学属性. 人工源地震可以给出深达数十公里处的精细结构. 然而人们总不能花费昂贵的代价在地球上到处去打钻孔吧! 为此,地球物理深部找矿、勘探和开发便成为承担这一历史使命的核心或唯一. 因为金属矿产资源的形成与聚集是地球深部物质与能量的交换和其深层动力过程的产物^[5,27,28],而岩石圈和软流圈系统又与成矿环境密切相关^[98,99]. 为此必须深入研究深部第二成矿空间的介质属性和构造环境及其深层动力过程.

地面时间域电磁法(TEM)、可控源音频大地电磁法(CSAMT)、高精度重、磁法、高精度深地壳宽角反射/折射技术、高分辨率地震反射技术和小孔径精细三维地震层析成像技术(包括井间成像技术)等,即以大探测深度为导向的地面地球物理探测方法和大探测深度时间域航空电、磁法、重力梯度法和钻孔地球物理测量方法等在矿产资源勘查中的使用^[62,100~104],大型、超大型矿床和多金属矿集区的找矿、勘探和开发(特别是深层隐伏矿床和盲矿体的寻找与圈定)及深部物质运移和深层动力过程对控矿的研究带来了契机.

6.2 地面高精度地震波场探测方法与技术

深部找矿、勘探与开发的核心是必须深入研究区域性和矿区内的精细深部结构,圈、层耦合和动力学响应,进而求得成矿规律,成矿环境、成矿系统和成矿演化过程. 以资较为全面的认识矿床产出的深度空间及其制约要素,厘定金属矿床形成、聚集与分

布的必要条件和充分条件,并运用适宜的方法,探查和发现深部矿床.

矿集区的深部细结构是成矿环境和成矿空间研究的关键背景问题之一,而深部地球物理探测则是研究成矿作用与深部构造环境相互关系的基础. 其中,尤以高精度深部地震探测资料能够刻划地壳的精细层、块结构. 随着地震技术的巨大进步及对成矿规律研究的深入,地球物理勘探界已将此技术应用于金属矿床勘查及成矿动力学的理论研究中,并逐渐形成了 3 个新的应用技术,初步取得了显著效果.

(1)成矿带深部地壳宽角反射/折射技术,它可以给出成矿带的空间构造框架和成矿系统的介质与构造的信息与空间环境,特别是速度结构、Q 结构和泊松比结构及各向异性结构;如穿过西澳 Mt. Isa 金矿省的深地震反射剖面清晰地揭示出地壳内部成矿流体的运移路径^[105~108].

(2)高分辨率地震反射技术,直接用于深部金属矿产勘探,尤其对探测容矿构造和矿体周围的蚀变带具有良好的效果^[109]. 特别是成矿过程和矿物元素聚集的控矿空间. 例如,在全球最深的 Western Deep Levels 金矿床进行的精细 3-D 地震探测不仅提供了其它成矿模型无法约束的深部构造信息,而且确保我们能够详细了解控矿构造的产状变化,从而为区域找矿和在尚未发现矿床或矿体地域的成矿预测提供了关键性的线索和可利用的模型^[21].

近年来,金属矿产的地震勘探方法越来越多地利用于研究程度较高的成矿区、带或老矿区周边和深部控矿构造与容矿岩石物理属性的探查,乃至直接用于寻找深部盲矿体……等,且均取得较为明显实效. 例如,在加拿大诺兰达矿区^[110];地震反射方法成功地确定出容矿火山岩的下界. 在马塔加米矿区,地震测量能够进行火山岩地质填图,划分不同的地层单元;在布肯斯矿区,利用地震方法较好地圈出了控矿构造.

(3)高分辨率的地震层析成像技术,可以直接给出矿体和容矿构造的空间展布形态^[111];利用密集型地震台阵观测,并配以井间成像技术,对于给出成矿区及周边地带的三维图像有着极为重要的作用.

6.3 深部隐伏矿体的探查与圈定的井下地球物理观测方法和技术

井下地球物理勘探和如何发现与圈定深部隐伏矿床,这是一个十分关键的难题. 由于深部矿床的空间位置一般较深,它在浅部反映的示踪标志信号一般均比较微弱,即为在高干扰背景下,提取微弱的有

效信息. 这除进行地面高精度的地球物理场观测, 以获取高分辨率信息外, 还必须充分、有效地利用有限的钻孔、坑道, 特别是深钻井来直接和间接揭示深部介质与结构空间的矿化信息和介质的地球物理属性, 并进行精细的研究和判断; 另外还应适当开展钻井中和坑道内的物、化探等工作, 以资近距离捕捉矿化示踪的物理、化学标志. 近年来, 钻孔地球物理方法的进展使一些老矿山深部找矿工作呈现出新的活力, 利用各种方法组合效应, 已经发现了一批极富的铜、镍硫化物和金矿床^[112~114]. 这种方法除了获得井壁介质地球物理参数外, 更重要的是可以获取井壁四周和钻孔底部介质的物理信息. 钻井地球物理方法是多样的, 如井中磁测、井中瞬变电磁法、井中温度、井中重力、井中放射性、井中磁测、井中激发极化法、井中充电法、井中地震波速度和弹性模量的测定及多波多分量 VSP 测量等.

井中瞬变电磁法在西方一些国家使用较多, 且为找矿效果较好的一种方法, 工作深度可达 2500~3000 m, 可探测井中半径为 200~300 m 范围内的良导体. 加拿大萨德伯里铜、镍矿区通过深部钻孔中瞬变电磁测量方法组合, 从 20 世纪 80 年代中期以来相继发现了一批深部铜、镍硫化物矿床. 哈萨克斯坦应用井中充电法在库斯穆龙矿区成功地探测到 700 m 深处的块状含铜黄铁矿矿体. 在开展钻井物化探工作的同时, 也要针对深部矿床的特异结构, 介质的物理属性和构造格局, 研究和发现新的示踪标志及适宜的探测方法. 一些有效的常规找矿、勘探方法也可提供重要信息, 例如, 寻找矿区内成矿后岩脉或断层在深部穿过矿体, 则可能将破碎的矿块(粉)带到浅部, 从而提供深部存在矿体的证据. 勘查地球化学表明, 当地下气体通过矿床或矿床周围的原生分散晕时, 它也会将超微细颗粒的成矿元素带到浅部、直到地表, 从而可以提供比较可靠的有关深部可能存在大型矿床的信息^[115].

应当清晰地认识到, 深部成矿的介质和构造环境与深层物质运移的物理—力学—化学过程和成矿规律与系统乃是深部找矿、勘探和开发研究中极为重要的核心问题. 因为, 一个好的深部介质和构造环境与成矿空间和一个发育完善的成矿系统, 必具有一定的时—空边界, 形成四维网络结构, 并常能聚集多个矿种和多种矿床类型. 为此, 了解成矿系统和成矿环境, 有助于人们厘定研究区的成矿过程和深化对矿床类型的整体认识, 在深部找矿、勘探中可起到由已知到未知、并提高找矿的成效^[11]. 例如, 安徽

321 地质队和江西赣西北地质队依据对长江中下游成矿带矿床组合和“多位一体”的认识, 进行深部找矿, 分别发现了狮子山矿田深部的冬瓜山铜矿和城门山矿床的深部层控矿体.

基于人工源地震勘探方法分辨率高, 加拿大、俄罗斯、澳大利亚、南非和中国等国家, 在大型和超大型金属矿区及多金属矿集区均将地震技术用于深部找矿、勘探和开发, 并取得了很好的效果. 为此, 在第二深度空间(500 m~2000 m)的深部找矿、勘探与开发中, 在确定控矿介质与构造环境中将必具有极为重要的作用和应用前景.

7 第二深度空间找矿、勘探与开发乃是当今深部金属矿产战略后备基地建设和可持续发展的必须

现代矿床学应当是地球物理学、地球化学、和地质学集成的一个综合体系, 研究的一个重要发展趋势; 是把成矿环境和成矿系统作为地壳演化的一部分, 并特别重视成矿作用与地壳深部结构及深层动力学响应的研究. 因为, 深部结构和深层动力过程的研究是探讨地球内部物质和能量交换、物质运移和成矿元素分异、调整与聚集的充分和必要条件. 它们的主要研究途径有三:

①通过深部地球物理探测研究以揭示地壳深部介质结构与聚集的空间格局和成矿作用及矿化类型及其深层过程;

②通过高精度的地球物理场观测, 以揭示深部成矿的介质和构造环境, 成矿介质和围岩的物质属性与成矿的动力学响应;

③通过综合地球物理场、深源岩电子探针、地球化学示踪与物理—数学模拟和实验以查明结晶基底, 以及地壳和上地幔结构与物质组成, 并以此来建立深部介质结构、构造及深层动力过程与浅部矿床之间的耦合关系, 进而揭示成矿作用的垂向分布和演化特征^[116].

深部地球物理探测是研究深部成矿作用和壳、幔结构及其演化内在关系的基础之一, 利用大探测深度的地面地球物理技术为基础的综合方法体系, 以进行矿集区深层过程与控矿作用的研究. 可以解决的问题包括: 确定沉积盖层和风化层的厚度、物质组成、物理参数, 特别是空间展布的非均匀性; 研究造山带基底的起伏与对基底进行岩性填图(填绘基底构造、研究基底内部构造); 建立壳、幔结构和各类断裂展布与成矿空间的深部断面, 并在此基础上, 探

讨深部动力过程的控矿作用。

7.1 玻璃地球计划

最近澳大利亚开展了一项雄心勃勃的计划,即“玻璃地球计划”(The Glass Earth)^[63],目的是利用当代高新技术集成发展新一代找矿勘探方法,使大陆表层 1000 m 深度范围内像玻璃一样透明^[63,66]。加拿大也提出类似的想法,拟发起一项玻璃地球计划的项目,致使加拿大地壳表层 3000 m 深度范围内透明^[64,67]。目前在玻璃地球计划中正在实施的主要内容包括:新一代探测技术、提高对风化层及下伏基岩中地质过程的认识、增强空间数据管理、综合和解释的地理信息技术、矿床发现的概率和预测模型。在本世纪初,中国国土资源部设立了“大型矿集区深部精细结构与含矿信息”项目,旨在通过新技术探测大型矿集区地壳精细结构和流体输导系统与迁移路径,以揭示成矿与元素聚集的深层动力过程和成矿与找矿效应^[117]。

7.2 地球物理深部找矿、勘探与矿体圈定

近年来,利用勘查地球物理资料,研究区域成矿背景,开发深部地球物理—地质“填图”,圈定和优选找矿靶区取得了一定的进展。

(1)俄罗斯在诺里尔斯克铜镍矿区,利用磁场滤波,定量解释、确定了上地幔和含矿侵入体之间存在的中间岩浆源(深部矿源体)与矿体规模的关系,提出了下一步勘查的远景区。

(2)美国西部中、新生代脉状热液矿床、斑岩型矿床和以沉积岩为容矿岩石的金矿床等大型矿床与重、磁场特征之间关系的研究结果表明^[118],大多数矿床位于总磁化强度低和中等岩石圈厚度地带,石英脉型金矿床明显沿北北西向的重力高分布,反映了石英脉型金矿床可能与镁铁质火山岩和深成岩有关。经过滤波,突出中等异常的重、磁场特征、以地球物理技术圈定出矿集区的范围。

(3)在中国铜陵狮子山矿田利用地震反射技术成功的探测到该地区的主要赋矿层位——黄龙组和五通组的界面,并揭示出盖层中不同地层的非耦合变形特征,为该区深部隐伏矿床的找矿、勘探、开发和动力成矿的研究提供了理论依据^[94,101]。可见,地球物理找矿、勘探方法、技术和所取得的深部信息有利于阐明成矿区的介质与构造背景,预测热液矿化的有利介质和构造环境及大型矿集区。

(4)澳大利亚研究表明^[60,119],不同成矿系统的数量和规模受到 3500 Ma 以来地壳演化的制约,主要成矿系统具有特定的时空边界属性,显示出其形

成与大陆地球动力学演化密切相关。综合考虑澳大利亚大陆成矿作用与全球构造运动,尤其是超大陆拼合和裂解以及澳大利亚大陆板块构造增长之间关系的众多模型,并提供了在成矿系统的形成和演化过程中,壳、幔相互作用的框架。澳大利亚造山带金矿的分布常常与上百到数千公里的大型断裂密切相关,三维地震研究结果表明^[108],如此大规模的断裂构造系其在垂向的延深也应该有几十公里。例如, Kalgoorlie 地区深部地壳地震反射剖面揭示出地壳中存在 5~10 km 长的不连续面,有些还深达地幔。可见,热液成矿系统的形成紧密地受到深部构造的制约,而且可能存在于地壳—地幔尺度的热液系统^[120]。为此成矿系统模型的研究必须探讨;地壳尺度的构造控矿系统及壳、幔相互作用的深层动力过程^[119]。

基于以上所述可见;在我国快速工业化进程中,在利用世界资源的同时,必须立足本土、强化进行第二深度空间的找矿、勘探和开发,深化研究和探索地球内部物质与能量的交换和其深层动力过程,从理论和成矿的动力机制出发,以资在深部找到大型、超大型矿床和多金属矿集区,这是在我国建立起金属矿产资源战略后备基地的重要保障。因为这是安全、可靠、稳定资源供给和可持续发展的必须。

8 结 语

迅速进行我国地壳内部第二深度空间的找矿、勘探和开发标志着金属矿产资源这一事业已开始进入到一个崭新的转折时期,是金属矿产资源的新一轮勘查(第二轮金属矿产资源勘查),亦可视为将是一次富有突破性的“革命”性举措。因此,不论是在理论上,方法上均必须具有新的理念,而且在技术上,特别是在观测仪器与设备的精度、采集技术和对深层矿产资源的探测能与分辨率上均必须有一定质的提高;改进、突破和创造。为此必须;

(1)深化认识地球本体,精细刻画壳、幔深部介质的精细结构。20 世纪中叶以来国际上实施了一系列的、卓有成效的探测深部壳、幔结构的高精度探测计划(美、英、法、德、俄、意、加、瑞、澳……等)^[20,121~125],均取得了前所未有的新认识和新成果。

这一系列的地球深部探测计划^[63~67],大大深化了对地球本体的认识,发现了地壳中的拆离断层,不同产状的深大断裂,大陆的陆内俯冲,地壳低速层的不均匀分布,介质与结构的各向异性和碰撞动力

边界与成矿空间与条件等,并建立了一系列新的有关地球动力学方面的认识,如推覆构造、碰撞造山、拆沉作用,断离作用,底侵作用,特别是成山、成盆、成岩、成矿、成灾和成核的深层耦合效应和物质与能量的交换等,推动了地球内部物质运移的深层过程与地球动力学的发展.可以这样说,半个世纪以来,对地球本体的深化认识和一系列的发现或有关理论及模型的建立均离不开地球深部的地球物理探测和所提出的地球深部介质和构造环境及其物质的属性与运动状态.

在矿产资源方面,揭示了深部成矿空间的精细结构与深层过程的关系,特别是深部大型、超大型矿床的发现,控矿构造,介质属性与动力学响应的研究得以深化.为此,大幅度的提高了对矿产资源的勘查能力,发现了一些深成的和潜伏的矿产资源,如阿伯拉契亚造山带(推覆体)下面的油气田,西伯利亚东北矿集区的地幔流体上涌通道,南非、加拿大、澳大利亚和我国一系列深藏的金属矿产资源的新突破、新发现……等.

(2)在深度 500 m~2000 m 以内,即第二找矿深度空间进行金属矿产资源的地球物理勘查.通过高精度的重力场、地电场、地磁场^[13,118,126],人工源地震勘探等^[11,62,63]地球物理场观测和井下地球物理观测^[101~113],并进行反演与多要素约束下初始模型的提取和物理-数学模拟,从成矿区(带)的深部构造背景^[106]、介质属性、物理-力学-化学过程与状态查明矿体的纵向延伸与储存空间.在这一基点上,建立起具有特色的第二深度空间的找矿勘探理论、方法和运动学与动力学的成矿模型.

(3)探测技术的改进和自主创新

为了迎接第二深度空间找矿勘探和开发与利用高潮的到来,现有地球物理探测技术的利用,特别是其改造和提高必须针对第二深度空间找矿、勘探、开发和效能;必须有效的利用和引入相邻学科高、新技术的已有成就,并要提出新的思想和途径,研制、开发新一代的高精度的和深部高分辨率的地球物理探测仪器与设备^[127,128].基于这两个方面;以适应国家的战略需求,必须迅速建设自主创新型第二深度空间找矿勘探和开发的地球物理探查体系.因为:

①引进技术,不等于引进了创新能力.但目前还需要引进,故对引进技术要不断消化、开发,并进行改造和提高.

②创新理论与方法的呈现是以创新的技术手段、方法为先导,必须利用当今高、新技术已有成就,

研制出创新型的、适于第二深度空间找矿、勘探与开发的探测仪器和新一代的地球物理观测与实验设备.

③逐步建立,并形成第二深度空间找矿勘探、开发和利用的数据库与软件程序包(模块),以达形成自主的创新体系.

当今在第二深度空间的找矿、勘探和开发中,高精度探测方法与技术十分关键.因为只有这样才能采集到高分辨率的信息,进而通过反演、分析、研究和解释以提出新的认识和新的成果,在深处发现新的矿体、并建立起新的运动学与动力学的成矿模型.

最近国家发出了《国务院关于加强地质工作的决定》,这是号角,也是动员令,更是本世纪地球科学工作者,特别是地球物理工作者的神圣职责.地球物理学必须全方位的穿越地平线,向纵深"挺进",在地球深处汲取更多的、更丰富的金属矿产资源.迅速建立起金属矿产资源的战备后备基地,以达在祖国快速工业化和经济腾飞进程中,保证安全、可靠、稳定的资源供给,以形成祖国科学与技术、社会与经济的可持续发展和人民安居乐业的坚实后盾,为人类社会与经济的共同繁荣做出应有的贡献!

参 考 文 献 (References):

[1] 中国科学院可持续发展战略研究组.中国可持续发展战略研究报告[M].北京:科学出版社,2006,3~15.
Research group of sustainable development strategy of Chinese Academy of Sciences, 2006 China sustainable development strategy report [M]. Chinese Sciences Press, Beijing, 2006,3~15 ,2006(in Chinese).

[2] 王安建,王高尚,张建华,等.矿产资源与国家经济发展.北京:地震出版社,2002.
Wang A J, Wang G S, Zhang J H, *et al.* Mineral resources and state economic development. Seismological Publishing House, Beijing, 1~330,2002 (in Chinese).

[3] 滕吉文.当今中国岩石圈物理学研究中的几个重要问题与思考[J].地球物理学进展,2006,21(4):1033~1042.
Teng J W. Some important scientific problems and ponders in lithospheric physics research of China at the present time[J]. Progress in Geophysics (in Chinese), 2006, 21(4): 1033 ~ 1042.

[4] 滕吉文.当代地球物理学向何处去[J].地球物理学进展,2006, 21(2):327~339.
Teng J W. Where are the contemporary Geophysics of China going [J]. Progress in Geophysics (in Chinese), 2006,21(2): 327~339.

[5] 国土资源报记者赵凡访地球物理学家滕吉文,地球深部研究迫在眉睫.国土资源报[M].第二版综合新闻,2006年2月7日.
Vist Geophysist Teng Ji-wen by News paper reporter Zhao

Fan of land and resources of China, Extremely urgent of earth's deep reseach[M]. News paper land and resources of China. 2006,02,07.

[6] 吕古贤,曾绍金,郑大瑜,等. 我国主要金属矿产矿山资源危机程度评价[M]. 北京:中国大地出版社,2004,1~160.

Lü G X, Zeng S J, Zheng D Y, *et al.* The survey and evolution of resources potential for crisis mines in China. China Land Publishing House[M]. Beijing, 2004, 1~160 (in Chinese).

[7] 戴自希,王家枢. 矿产勘查百年[M]. 北京:地震出版社,2004.

Dai Z X, Wang J S. Hundred years of mineral exploration [M]. Seismological Publish House, Beijing, 2004 (in Chinese).

[8] 施俊法,姚华军,李友枝,等. 信息找矿战略与勘查百例[M]. 北京:地质出版社,2005.

Shi J F, Yao H J, Li Y Z, *et al.* 100 examples for strategy of informational exploration and exploitation [M]. Geological Publishing House, Beijing, 2005.

[9] 涅克拉索夫 E M. 与火山构造有空间关系的近地表矿床和浅成矿床[J]. 金属矿床地质与勘查译丛, 1980, 15.

Niekelas E M. Ore deposits of near ground and shallow ore deposits with space relation of volcanic tectonic[J]. Geology of metal ore deposits and prospecting collected works, 1980, 15.

[10] 莫伊谢年科著·Φ·C, 高中和译. 深部地质学原理[M]. 北京:地质出版社,1986.

Moyixionienko F C (Translator: Gao Zhonghe). Principle of deep geology[M]. Geological Publish House, Beijing, 1986.

[11] 吕庆田,史大年,赵金花,等. 深部矿产资源勘查的震学方法:问题与前景——铜陵矿集区的应用实例[J]. 地质通报, 2005, 24(3): 211~218.

Lü Q T, Shi D N, Zhao J H, *et al.* Seismic method for deeper mineral exploration: Problems and prospects-A case study of the Tongling ore district[J]. Geoligical Bulletin of China, 2005, 24(3): 211~218.

[12] 翟裕生,邓军,王建平,等. 深部找矿研究问题[J]. 矿床地质, 2004, 23(3): 143~149.

Zhai Y S, Deng J, Wang J P, *et al.* Researches on Deep Ore Prospecting[J]. Mineral Deposits, 2004, 23(2): 143~149.

[13] 王谦身,滕吉文,安玉林,等. 三江成矿带的地球物理场与深部结构及其对成矿作用的制约[J]. 矿床地质, 2004, 23(增刊): 1~13.

Wang Q S, Teng J W, An Y L, *et al.* Restriction role of geophysical field and deep structures in mineralization of Sanjing metallogenic belt[J]. Mineral Deposits, 2004, 23(Supp): 1~13.

[14] 邱瑞照,邓晋福,李廷栋,等. 岩石圈不连续与大陆成矿作用[J]. 矿床地质, 2004, 23(增刊): 32~40.

Qiu R Z, Deng J F, Li T D, *et al.* Lithospheric discontinuity and continental metallogenesis[J]. Mineral Deposits, 2004, 23(Supp): 32~40.

[15] 邓军,杨立强,葛良胜,王庆飞,张静,高帮飞,周应华,江少卿. 胶东矿集区形成的构造体制研究进展[J]. 自然科学进展, 2006, 16(5): 513~518.

Deng J, Yang L Q, Ge L S, *et al.* Research advances in the mesozoic tectonic regimes during the formation of jiaodong Ore cluster area[J]. Progress in Nature Sciences, 2006, 16(5): 513~518.

[16] 肖庆辉,施俊法,刘树臣. 国外矿产资源研究的重要发展趋势[J]. 国土资源情报, 2003, 12: 1~4.

Xiao Q H, Shi J F, Liu S C. The development and trend for metal ore deposits in world[J]. Information of land and Resources of China, 2003, 12: 1~4.

[17] 滕吉文,张中杰,白武明,等. 岩石圈物理学[M]. 北京:科学出版社,2004.

Teng J W, Zhang Z J, Bai W M, *et al.* Physics of lithosphere. Chinese Sciences Press, Beijing, 2004 (in Chinese).

[18] 滕吉文. 21 世纪地球物理的机遇与挑战. 2004 提中国科学院科学发展报告[M]. 北京:科学出版社,2004.

Teng J W. Opportunity challenge and developing frontiers: geophysics in 21st century[M]. Chinese Sciences Press, Beijing, 2004 (in Chinese).

[19] 翟裕生,张明,宋鸿林,等. 大型构造与超大型矿床[M]. 北京:地质出版社,1997.

Zhai Y S, Zhang H, Song H L, *et al.* Macroscopic structures and superlarge ore deposits[M]. Beijing: Geological Publish House, 1997.

[20] 裴荣富,邱小平,尹冰川,等. 成矿作用爆发异常及巨量金属堆积[J]. 矿床地质, 1999, 18(4): 333~340.

Pei R F, Qiu X P, Yin B C, Xiong Q Y. The explosive anomaly of ore-forming processes and superaccumulation of metals[J]. Mineral Deposits, 1999, 18(4): 333~340.

[21] Mark A S G, Stephen J J, Andrew C B. Interpretation of the Western Ultra Deep Levels 3-D seismic survey[J]. The Leading Edge, Jul 2000; 19: 730~735.

[22] 中国有色金属工业总公司江西地质调查局,《江西银山铜铅锌矿床》编写组,江西银山铜铅锌金银矿床[M]. 北京:地质出版社,1996.

Jiangxi Geology Exploring Bureau, China Metal Industry Co. Jiang xi Yinshan Cu-Pb-Sn-Au-Ag Deposit[J]. Beijing: Geological Publishing House, 1996 (in Chinese).

[23] 肖克炎,冯京,高兰,等. 阿舍勒铜铅矿床及三维定位预测[M]. 北京:地质出版社,2002.

Xiao K Y, Feng J, Gao L, *et al.* Ashele Cu-Zn deposit and prognosis of three-demension methods[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2002.

[24] 刘光鼎,郝天姚. 中国地质环境与隐伏矿床[J]. 地球物理学报, 1998, 41(2): 182~188.

Liu G D, Hao T Y. Geological environment and hidden mineral deposits in China[J]. Acta Geophysica Sinica, 1998, 41(2): 182~188.

[25] Groves D I. The crustal continuum model for late-Archean lode-gold deposits of the Yilgam Block, Western Australia [J]. Mineral Deposits, 1993, 28: 366~374.

[26] Yang K H. Magmatic fluid and mineralization[J]. Earth Sci-

ence Frontiers, 1998, 5(3):7~36.

[27] 滕吉文. 地球内部物质、能量交换与资源和灾害[J]. 地学前缘, 2001, 8(3):1~8.

Teng J W. The exchange of substance and energe different sphere coupling and deep dynamic process within the earth [J]. Earth Science Frontiers, 2001, 8 (3):1~8.

[28] 滕吉文. 地球深部物质和能量交换的动力过程与矿产资源的形成[J]. 大地构造与成矿学, 2003, 27(1): 3~21.

Teng J W. Dynamic process of substance and energy exchanges in depths of the earth and formation of mineral resources [J]. Geotectonica et Metallogenia, 2003, 27(1): 3~21.

[29] 裴荣富, 翟裕生, 张本仁. 深部构造作用与成矿[M]. 北京: 地质出版社, 1999.

Pei R F, Zhai Y S, Zhang B R. Deep structural processes and mineralization [C]. Beijing : Geol. Pub. House (in Chinese).

[30] 亚科夫列夫·Ю·Н, 卡赞斯基·Б·Н 著, (丁万烈译). 科拉半岛超深钻井剖面与地表的矿化对比[J]. 世界地质, 1999, 18(4):36~46.

Yakofuliev Y N, Khazam shi ji F N(translator: Ding W L). Contrast between superdeep drilling profile and mineralization of surface[J]. World Geology, 1999, 18(4):36~46.

[31] Billingsley P, Lock A. Structure of ore districts in the continental framework [J]. Am. Inst. Min. Metall. Engrs. Trans, 1941, 144, 9~64.

[32] Billingsley P, Lock A. Tectonic position of ore districts in the Rocky Mountain region[J]. Am. Inst. Min. Metall. Engrs. Trans, 1935, 115, 59~65.

[33] Tomson I N, Favorskaya M A. Ore-concentrating structures and principles of local prognosis of endogenous mineralization [J]. Sov. Geology, 1968, 10: 6~20.

[34] Kutina J. Hydrothermal ore deposits in the western United States: a new concept of structural control of distribution[J]. Science, 1969, 1113~1119.

[35] Sillitoe R N. Tin mineralization above mantle hot spots[J]. Nature, 1974, 248: 497~499.

[36] Kutina J. Global tectonics and metallogeny; Deep roots of some ore-concentrating fracture zones. A possible relation to small-scale convective cells at the base of lithosphere[J]. Adv. Space Res. 1983, 3: 201~214.

[37] Betts P G, Giles D, Lister G S, *et al.* Evolution of the Australian lithosphere[J]. Australian Journal of Earth Sciences, 2002, 49: 661~695.

[38] Favorskaya M A, Vinogradov N V. Geological evolution of ore-concentrating lineaments[J]. Global Tectonics and Metallogeny, 1991, 4(1/2):75~84.

[39] O'Driscoll E S T, Campbell I B. Mineral deposit related to Australian Continental ring and fir structures with some terrestrial and planetary analogies[J]. Global Tectonic and Metallgy, 1997, 6(2): 83~101.

[40] Kutina J. The role of trans regional mantle-rooted structural discontinuities in the concentration of metals; with examples from the United States, Uzbkkistan and Burma, The role of mantle-rooted structural discontinuities in the concentration of metals-a3-dimensional aproch [M]. International work shop, 1998.

[41] 翟裕生. 中国区域成矿特征及若干值得重视的成矿环境[J]. 中国地质, 2003, 30(4):337~342.

Zhai Y S. Regional metallogenic features and some important ore-forming environments of China[J]. Geology in China, 2003, 30(4):337~342.

[42] Shahabpour J. The role of deep structures in the distribution of some major ore deposits in Iran, NE of the Zagros thrust zone[J]. Geodynamics, 1999, 28: 237~250.

[43] Pei R F, Peag C, Xiong Q Y. Deep tectonic processes and super-accumulation of metals related to granitoids in the Nanling metallogenic province, China[J]. Acta Geological Sinica, 1999, 73(2): 181~192.

[44] 邓军, 翟裕生, 杨立强, 等. 构造演化与成矿系统动力学——以胶东金矿集中区为例[J]. 地学前缘, 1999, 6(2):315~323.

Deng J, Zhai Y S, Yang L Q, *et al.* Tectonic evolution and dynamics of metallogenic system —an example from the gold ore deposits concentrated area in Jiaodong, Shandong, China [J]. Earth Science Frontiers, 1999, 6(2):315~323.

[45] 邓军, 杨立强, 孙忠实, 等. 构造体制转换与流体多层循环成矿动力学[J]. 地球科学, 2000, 25(4):397~403.

Deng J, Yang L Q, Sun Z S, *et al.* Ore-forming dynamics of tectonic regime transformation and multi-layer fluid circulation[J]. Earth Science, 2000, 25(4):397~403.

[46] 彭聪, 高锐. 中国大陆及邻近海域岩石圈/软流圈结构横向变化研究[J]. 北京: 地震出版社, 2000.

Peng C, Gao R. The studv for transverse variation of lithosphere and asthenosphere in continent and neighboring oceanic areas of China[J]. Seismological Press, Beijing, 2000, (in Chinese).

[47] Hill R I. Mantle plume and continental tectonics[J]. Science, 1992, 256:186~193.

[48] Kutina J. Criteria indicating a block structure of the upper mantle and its role in metallogeny[M]. In: Proceedings of the Seventh Quadrennial IAGOD Symposium. 1988, 111~120.

[49] Kutina J. Ore deposit controls by fracture patterns of the crust and by mantle-rooted structural discontinuities [J]. Earth Science Front, 1999, 6(1):29~35.

[50] 傅容栅, 冷伟, 常筱华. 地幔对流与深部物质运移研究的新进展[J]. 地球物理学进展, 2005, 20(1):170~179.

Fu R S, Leng W, Chang X H. Advancements in the study of mantle convection and the material movements in the deep Earth interior [J]. Progress in Geophysics (in Chinese), 2005, 20(1):170~179.

[51] 沈远超, 邹为雷, 曾庆栋, 等. 矿床地质学研究的发展趋势: 深部构造与成矿作用[J]. 大地构造与成矿学, 1999, 23(2):180~185.

Shen Y C, Zou W L, Zeng Q D, Liu T B. Recent develop-

ment in economic geology: deep-rooted structural discontinuities and ineralization. [J]. *Geo tectonica et Metallogenia*, 1999,23(2):180~185.

[52] 施俊法,肖庆辉. 区域构造与成矿作用研究的几个问题[J]. 国土资源情报,2001,(8):12~19.

Shi J F, Xiao Q H. A few problems for regional tectonics and research of metallogenesis[J]. *Information of Land and Resources of China*, 2001,(8):12~19.

[53] 滕吉文. 中国地球深部结构和深层动力过程与主体发展方向[J]. 地质论评,2002,48(2):125~139.

Teng J W. Deep structure of the earth ,deep dynamic process and leading direction in China[J]. *Geologicla Review*,2002,48(2):125~139.

[54] 戴自希. 全球超巨型金属矿床(区),中国地质矿产信息研究院编著:走向 21 世纪地质与矿产资源[M]. 北京:地质出版社,1996,35~42.

Dai Z X. Supergaint ore deposits (areas) in the world. In: Chinese Insitute of Geology and Mineral Resources Information, eds. *Geological sciences and mineral resources for the 21st century* [M]. Geological Publishing House, Beijing, 1996, 35~42.

[55] 翟裕生,林新多. 矿田构造学[M]. 北京:地质出版社,1993.

Zhai Y S and Lin X D , ed. 1993. Study of ore field structures[M]. Beijing : Geol. Pub. House. 1~214 (in Chinese).

[56] Zhai Y, Deng J. Outline of the mineral resources of China and their tectonic setting[J]. *Australia Journal of Earth Sciences*, 1996, 43(6): 673~685.

[57] 于文卿. 现代成矿规律学的基本问题[J]. 国外铀金地质, 1997,14(1):31~39.

Yu W Q. Basic problems on the modern metallogency[J]. *Overseas Uranium and Gold Geology*,1997,14(1):31~39.

[58] Yang L Q, Deng J, Zhang Z J, *et al.* Crust-mantle structure and coupling effects on mineralization: an example from Jiaodong Gold Ore Deposits Concentrating Area, China [J]. *Journal of China University of Geosciences*, 2003, 14(1):42~51.

[59] Yang L Q, Deng J, Wang Q F, *et al.* Coupling Effects on Gold Mineralization of Deep and Shallow Structures in the Northwestern Jiaodong Peninsula[J]. *Eastern China. Acta Geologies Sinica*, 2006, 80(4) (in press).

[60] Barley M E, Groves D I. Supper-continent cycles and the distribution of metal deposits through time[J]. *Geology*, 1992, 20:291~294.

[61] Deng Jun, Yang Liqiang, Sun Zhongshi, *et al.* A metallogenic model of gold deposits of the Jiaodong granite-greenstone belt[J]. *Acta Geologica Sinica*. 2003, 77(4): 537~546.

[62] 吕庆田,侯增谦,史大年,等. 铜陵矿集区的地壳结构及对成矿过程的启示. 见:中国大陆地球深部结构与动力学研究[M]. 北京:科学出版社,2004,833~845.

Lü Q T, Hou Z Q, Shi D N, *et al.* Crustal structure beneath the Tongling ore deposit area and its implication to minero-genic process. In: Zhang Z Z, Gao R, Lü Q T, *et al.* eds. *Earth deep-stead structures and geodynamics in Chinese continent*[M]. Chinese Sciences Press, Beijing, 833~845.

[63] Cart G R, *et al.* "玻璃地球"——穿透覆盖层勘查的地球化学前沿[J]. 国土资源情报,2002(12):46~50.

Car G R, *et al.* "Class Earth"-the geochemical frontiers prospecting under the overburden[J]. *Information of land and Resources of China*, 2002,12:46~50.

[64] Jeremy Hall B A. The contribution of geoscience to Canada's Innovation Strategy[M]. *Smart tools and human resources for vibrant resource and environmental industries*. 2002.

[65] 翟裕生,吕古贤. 构造动力体制转换与成矿作用[J]. 地球学报,2002b,23(2):97~102.

Zhai Y S, Lü G X. Transition of tectonic and dynamic regime and mineralization[J]. *Acta Geoscientia Sinica*,97~102.

[66] 刘树臣. 发展新一代矿产勘探技术——澳大利亚玻璃地球计划的启示[J]. 地质与勘探,2003,39(5):53~56.

Liu Shuchen. Towards the next generation of giant minerals exploration techniques: some considerations about the glass earth[J]. *Geology and prospecting*, 2003,39(5):53~56.

[67] 肖庆辉,施俊法,刘树臣. 国外矿产资源研究的主要发展趋势[J]. 国土资源情报,2003,(12):1~4.

Xiao Q H, Shi J F, Liu S C. Research progress of mineral resources in broad[J]. 2003,(12),1~4.

[68] Groves D I *et al.* Archean lode-gold deposits: the products of crustal-scale hydrothermal systems[J]. *Brazil Gold91: 1992*, 299~305.

[69] Groves D I, Goldfarb R J, Gebre-Mariam M, *et al.* Orogenic gold deposits: a proposed classification in the context of their crustal distribution and relationship to other gold deposit types[J]. *Ore Geology Reviews*, 1998, 13:7~27.

[70] Ledair A D. Cruslal-scale auriferous shear zones in the Central Superior Province[J]. *Canada. Geology*, 1993,21: 1298~1307.

[71] 毕献武,胡瑞忠. 深部过程对哀牢山金矿带成矿的制约[J]. 地球学报,1997,18(增刊):167~169.

Bi X. W, Hu R. Z. Mantle-derived sulfur and its constraints on gold mineralization of Ailaoshan gold belt, China[J]. *Acta Geoscientica Sinica*, 1997,25, 615~619.

[72] Kerrich R, Goldfarb R, Groves D I, *et al.* The Characteristics, Origins, and Geodynamic Settings of Supergiant Gold Metallogenic Provinces [J]. *Science in China, Series D*, 2000, 43(Sup.): 1~68.

[73] 赵海玲,邓晋福,许立权,等. 冀东地区中生代花岗岩? 深部过程与金矿[J]. 桂林工学院学报,2001,21(1):20~26.

Zhao H L, Deng J F, Xu L Q, *et al.* The Mesozoic granite , deep process and gold deposits in the eastern Hebei region of China[J]. *Journal of Guilin institute of technology*, 2001,21(1):20~26.

[74] 王宝德,牛树银,孙爱群,等. 冀北地区中生代金银多金属矿床成矿物质来源和深部过程探讨[J]. 地质学报,2003,77(3):

379~386.

[75] Yang L Q, Deng J, Wang J G, *et al.* Control of deep tectonics on the superlarge deposits in China[J]. *Acta Geologies Sinica*, 2004,78(2):358~367.

[76] 申玉科,邓军,徐叶兵.煌斑岩在玲珑金矿田形成过程中的地质意义[J]. *地质与勘探*, 2005,41(3):45~49.

Shen Y K, Deng J, Xu Y B. Geological singnificance of lamprophyre during gold mineralization in the Linglong ore field [J]. *Geology and Prospecting*, 2005,41(3):45~49.

[77] 王义天,毛景文,叶安旺,等.小秦岭地区中深部含金石英脉的同位素地球化学特征及其意义[J]. *矿床地质*, 2005,24(3):270~279.

Wang Y T, Mao J W, Ye A W, *et al.* Isotope geochemical characteristics of auriferous quartz veins from medium and great depths of Xiaojinling area[J]. *central China and their significance*. *Mineral Deposits*. 2005,24(3):270~279.

[78] 刘丛强,黄智龙,李和平,等.地幔流体及其成矿作用[J]. *地学前缘*, 2001,8(4):231~241.

Liu C Q, Huang Z L, Li H *Pet al.* The geofluid in the mantle and its role in ore-forming processes[J]. *Earth Science Frontiers*, 2001,8(4):231~241.

[79] 毛景文,李晓峰,张荣华,等.深部流体成矿系统[M].北京:中国大地出版社,2005.

Mao J W, Li X F, Zhang R H, *et al.* Mantle-derived fluid-related ore-forming system [M]. *China Land Publishing House*, Beijing, 1~365.

[80] 倪师军.小秦岭中基性岩脉与金矿成因关系新模式[M].成都:西南交通大学出版社,1994.

Ni S J. New model of relationship between mafic dike and gold ore-forming, ed[M]. Xi'an Jiaotong University Press, Xi'an, 1994.

[81] 孙丰月,石淮立,冯本智.胶东金矿地质与幔源 C-H-O 流体分异成岩成矿[M].长春:吉林人民出版社,1995,1~170.

Sun F Y, Shi Z L, Feng B Z. Gold ore geology, lithogenesis and metallogensis related to the differentiation of mantle-derived C-H-O fluids in Jiaodong Peninsula[J]. *Eastern Chin. Jilin: Jilin People's Press*, 1995, 1~170 (in Chinese with English abstract).

[82] 滕吉文.康滇构造带岩石圈物理与动力学[M].北京:科学出版社,1994.

Teng J W. Lithospheric physics and Dynamics of tectonics zone in sichuan and yunnan Province[M]. *Chinese Sciences Press*, Beijing, 1994.

[83] Belousova E A, Grifftin W L, Walters S G, *et al.* Crustal evolution and crust-mantle interaction in the Mount Isa Eastern Successions;Terrance Chron analysis of detrital zircons. In: Williams P J, ed. *A Hydrothermal Odyssey Extended Conference Abstracts*. Jame Cook University[J]. *Economic Geology Research Unit Contribution*, 2001,59:18~19.

[84] 邵军.地幔流体及其金成矿作用:兼论夹皮沟金矿田的地幔流体与成矿[J]. *贵金属地质*, 1999,8(2):115~118.

Shao J. Mantle fluid and its role in gold ore-forming process taking Jiapiougou gold field for example[J]. *Journal of precious metallic geology*, 1999,8(2):115~118.

[85] 邵军.吉林东南部地幔活动与金的成矿作用[J]. *贵金属地质*, 1999,8(4):229~235.

Shao J. Mantle plume and gold-mineralization of southeast Jilin province[J]. *Journal of precious metallic geology*, 1999,8(4):229~235.

[86] 朱赖民,金景福,何明友,等.论深源流体参与黔西南金矿成矿的可能性[J]. *地质论评*, 1997,43(6):586~592.

Zhu L M, Jin J F, He M Y, *et al.* On the possibility of the participation of juvenile fluids in the gold deposit formation in southwestern Guizhou[J]. *Geological Review*, 1997,43(6):586~592.

[87] 王登红,林文蔚,杨建民,等.试论地幔柱对于我国两大金矿集中区的控制意义[J]. *地球学报*, 1999,20(2):157~162.

Wang D H, Lin W W, Yang J M, *et al.* Controlling Effects of the Mantle Plume on the Jiaodong and Dian-Qian-Gui Gold-concentration Area[J]. *Acta Geoscientia Sinica*, 1999,20(2):157~162.

[88] 郭光裕.热泉型金矿床成矿模式及成矿远景评价[M].天津:天津科学技术出版社,1993.

Guo G Y, Huo Z L, Lin Z H, *et al.* Metallogenic model and prospective value of hot spring gold deposit. *Tianjing Sci. & Tech. Press*[M]. Tianjing, 1993 (in Chinese).

[89] 聂辉军,张辉旭.碱性岩浆活动与金成矿作用[J]. *国外矿床地质*, 1997,(3):1~36.

Nie F J, Zhang H X. New progress on Au deposits related to alkaline rocks[J]. *Oversea Deposit Geology*, 1997, (3): 1~36.

[90] Stewart K, Schaefer B, Foden J. Proterozoic magmatism and crustal growth on the Gawler Carton, South Australia. In: Cassidy K F, Dunphy J M, Van Kranendonk M J, eds. *Fourth International Archaean Symposium* [M]. *Extended Abstracts*, 1999, 191.

[91] Carr G R, Dean J A, Suppol D W, *et al.* Precise lesl istope of hydrothermal activity associated with Ordovician to carboniferous metallogenic events in the Lachlan Fold Belt of New South Wales[J]. *Economic Geology*, 1995,90:1467~1505.

[92] Condie K C. Plate Tectonics and Crustal Evolution[M]. Oxford: Pergamon Press, 1989, 476.

[93] Sawkins F J S. Metal Deposits in Relation to Plate Tectonics [M]. Berlin: Springer Verlag, 1990, 461.

[94] 李晓波.地球动力学演化与巨型矿集区的形成[J]. *地学前缘*, 1998,5(增刊):103~108.

Li X B. Geodynamics and the formation of giant deposit clusters[J]. *Earth Science Frontiers*, 1998,5 (Supp.):103~108.

[95] 高原,滕吉文.中国大陆地壳与上地幔地震各向异性研究[J]. *地球物理学进展*, 2005,20(1):180~185.

Gao Y, Teng J W. Studies on seismic anisotropy in the crust and mantle on Chinese mainland [J]. *Progress in Geophysics* (in Chinese), 2005,20(1):180~185.

[96] 滕吉文,张中杰,王光杰,王铁男.地球内部各圈层介质和构造

的地震各向异性与地球动力学[J]. 地球物理学进展, 2000, 15(4): 1~35.

Teng J W, Zhang Z J, Wang G J, Wang T N. The seismic anisotropy and geodynamics of earth's interior media[J]. Progress in Geophysics, 2000, 15(4): 1~35.

[97] 滕吉文. 中国地球物理仪器和实验设备研究与研制的发展与导向[J]. 地球物理学进展, 2005, 20(2): 276~281.

Teng J W. The development and guide direction of Research and manufacture of Geophysical instruments and experimental equipments in China[J]. Progress in Geophysics (in Chinese), 2005, 20(2): 276~281.

[98] 彭聪, 邓晋福, 邱瑞照. 中国大陆五大成矿域岩石圈结构与成矿作用[J]. 矿床地质, 2005, 23(增刊): 19~23.

Peng C, Deng J F, Qiu R Z. Relationship between lithospheric structures and metallogenic processes in five major metallogenic domains of Chinese continent[J]. Mineral deposits, 2005, 23(Suppl), 19~23.

[99] 邓晋福, 莫宣学, 赵海玲, 等. 中国东部燕山期岩石圈-软流圈系统大灾害与成矿环境[J]. 矿床地质, 1999, 18(4): 309~315.

Deng J F, Mo X X, Zhao H L, *et al.* The Yanshanian lithosphere-aesthenosphere catastrophe and metallogenic environment in east China[J]. Mineral Deposit, 1999, 18(4): 309~315.

[100] Salisbury M H, Milkereit B, Bieker W. Seismic imaging of massive sulfide deposits: part I. rock properties[J]. Economic Geology, 1996, 91: 821~828.

[101] 吕庆田, 侯增谦, 史大年, 等. 铜陵狮子山金属矿地震反射结果及对区域找矿的意义[J]. 矿床地质, 2004, 23(3): 390~398.

Lü Q T, Hou Z Q, Shi D N, *et al.* Tentative seismic reflection study of Shizishan ore field in Tonglin and its significance in regional exploration[J]. Mineral Deposit, 2004, 23(3): 390~398.

[102] 邵建波, 范继璋. 老岭成矿带航磁地质研究[J]. 地球物理学进展, 2004, 19(2): 449~454.

Shao J B, Fan J Z. Aeromayntic research of Laoling minoralization belt[J]. Progress in Geophysics, 2004, 19(2): 449~454.

[103] 李振峰, 曹清章, 陈天振, 等. 外间梯度测深法及其在深部找矿中的应用效果[J]. 地球物理学进展, 2006, 21(1): 244~247.

Li Z F, Cao Q Z, Chen T Z, *et al.* Outside grads detecting method and its application effect in deep ore exploration[J]. Progress in Geophysics (in Chinese), 2006, 21(1): 244~247.

[104] 丁建华, 肖克炎. 遥感技术在我国矿产资源预测评价中的应用[J]. 地球物理学进展, 2006, 21(2): 588~593.

Ding J H, Xiao K Y. The application of remote reusing in mineral resource assessment area[J]. Progress in Geophysics (in Chinese), 2006, 21(2): 588~593.

[105] Drummond B J, Goleby B R. Seismic reflection images of major ore-controlling structures in the Eastern Gold fields, Western Australia. Exp[J]. Geophys, 1993, 24: 473~478.

[106] Drummond B J, Goleby B R, Goncharov A G, *et al.* Crustal-scale structures in the Proterozoic Mount Isaianlier of north Australia: Their seismic response and influence on mineralisation[J]. Tectonophysics, 1997, 288: 43~56.

[107] Drummond B J, Goleby B R, Owen A J, *et al.* Seismic reflection imaging of mineral systems: Three case histories [J]. Geophysics, 2000, 65: 1852~1861.

[108] Drummond B J, Goleby B R. Yilgam crustal structure revealed in five seismic profiles. In: Geodynamic and gold exploration in the Yilgam, Australian Geodynamics Cooperative[J]. Research Centre Workshop Extended Abstracts, 1998, 23~31.

[109] Milkereit B, Eaton D, Wu J, *et al.* Seismic imaging of massive sulfide deposits: part II. Reflection seismic profiling [J]. Economic Geology, 1996, 91: 829~834.

[110] Knuckey, M J. Deep exploration for volcanogenic massive sulphide deposits in the Canadian Shield[J]. Geological Survey of Fimland Special Paper 1987, 1: 27~33.

[111] Goulty N. Centrelled-source tomography for mining and engineering application, In: Iyer H M and Hirahara K, eds [J]. Seismic tomography: Theory and practice. London: Chapman and Hall, 1993, 797~813.

[112] Jaques A L, *et al.* High-resolution geophysics in modern geological mapping[J]. AGSO Journal of Australian Geology & Geophysics, 1997, 17(2): 159~174.

[113] Killeen P G. Exploration geophysics[J]. Canadian Mining Journal, 1997, 2: 1~15.

[114] Killeen P G. Airborne and ground geophysics[J]. Canadian Mining Journal, 1998, 2: 13~23.

[115] 谢学锦. 巨型矿床的地表地球化学显示. 见: 张炳熹, 主编. 面向 21 世纪的应用地球化学——谢学锦院士从事地球化学研究 50 周年[M]. 北京: 地质出版社, 2002, 425~432.

Xie X J. The surficial geochemical expression of giant deposits. In: Zhang B X, ed. Applied geochemistry into the 21st century—50's anniversary of Academician Xie Xuejin's devoting to the research on geochemistry[M]. Beijing: Geol. Pub. House, 2002, 425~432 (in Chinese with English abstract).

[116] 杜杨松. 壳幔成矿学初探[J]. 矿床地质, 1999, 18(4): 341~346.

Du Y S. A preliminary approach to crust-mantle metallogeny[J]. Mineral deposits, 1999, 18(4): 341~346.

[117] 吕庆田. 大型矿集区深部精细结构与含矿信息——国土资源部专项研究计划[J]. 矿床地质, 2001, 21(2): 198.

Lü Q T, Shi D N, Zhao J H, *et al.* Seismic method for deeper mineral exploration: Problems and prospects — A case study of the Tongling ore district[J]. Geiologiical Bulletin of China, 2005, 24(3): 211~218.

[118] Hildenbrand T G, *et al.* Regional crustal structure and their relationship to the distribution of ore deposits in the western

United states, based on magnetic and gravity data[J]. *Economic Geology*, 2000,95(8):1583~1603.

[119] Jaques A L, Jaireth S, Walshe J L. Mineral system of Australia: an overview of resources, setting and processes[J]. *Australian Journal of Earth Sciences*, 2002, 49: 625~660.

[120] Sorjonen-Ward P, Zhang Y, Zhao C. Numerical modeling of orogenic processes and gold mineralization in the Yilgarn [J]. *Geological Society of Australia. Abstracts*, 2000, 59: 467.

[121] 滕吉文. 参加 2004 年第 32 届国际地质大会的点滴见闻与思考[J]. *地球物理学进展*, 2005, 20(3): 577~583.

Teng J W. A bit informations and contemplations for attending 32nd International Geological Congress in 2004[J]. *Progress in Geophysics*, 2005, 20(3): 577~583.

[122] Hanksson E P, Small K, Hafner R, *et al.* Southern California seismic network, Caltech/VSGS Element of TriNet 1997~2001[J]. *Seismological Research Letters*. 2001, 72(6): 697~711.

[123] Johannes Schweitzer, Jan Fyen, Svein Mykkeltvoit, Tor-mod Kvaerna. Seismic Arraga. Peter Bormann Chapter 9 of New Manual of Seismological observatory Proctice [M]. Potsdam; GeoFforckungs Zentrum Potsdam . 2002, 49~52.

[124] Rost S, Thomas C. Array seismology methods and application[J]. *Rev. Geophys*, 40 (3): 1008, doi: 10. 1029/2000RG000100, 2002.

[125] Jerm Hall B A. The contribution of geoscience to canada's innovation strategy[M]. *Smat tools and resources for vibrant resource and environmental industvies*, 2002.

[126] 姚敬金, 张素兰, 曹洛华, 等. 中国主要大型有色、贵金属矿床综合信息找矿模型[M]. 北京: 地质出版社, 2002.

Yao J J, Zhang S L, Cao L H. The ore probing model from synthesis information of large nonferrous metal and nobel metal deposits in China[M]. Beijing: Geological Publishing House, 2002.

[127] 陆其鹄, 孙世忠. 发展技术, 增强基础——地球物理仪器国际化与地球物理技术在工程上的应用研究讨论会综述[J]. *地球物理学进展*, 2004, 19(4): 726~729.

Lu Q H, Sun J Z. Devloping geophysical technology and strengthening its basement——Reriew on the symposiums on the internationalization of geophysical instruments and the applicanton of geophysical techology in engineering[J]. *Progress in Geophysics*, 2004, 19(4): 726~729.

[128] 滕吉文. 中国地球物理仪器的研制和产业化评述[J]. *石油物探*, 2006, 45(3): 209~216.

Teng J W. Comment on research manafcture and industrialization for the geophysical instruments in China[J]. *Geophysical prospecting for petroleum*, 2006, 45(3): 209~216.